智能制造背景下机电设备可靠性提升路径探究

刘安泰
易普力（新疆）矿山工程有限公司　新疆　昌吉　831700

摘　要：智能制造是制造业转型升级的主攻方向，对机电设备的可靠性提出了更高要求。高度自动化、柔性化生产及数据驱动决策对设备运行的持续稳定性、可预测性和快速恢复能力形成了刚性约束。与此同时，新一代信息技术的深度嵌入也为可靠性提升开辟了全新路径。本文系统分析了智能制造对机电设备可靠性的新挑战，从传统可靠性工程方法在新情境下的局限入手，重点围绕智能感知与状态监测、故障预测与健康管理、数字孪生驱动的设计优化、自适应容错控制以及智能运维决策等关键技术路径展开论述，构建了覆盖设计、运行、维护全生命周期的可靠性提升框架。在此基础上，从数据治理、标准体系、人才结构及组织管理等维度提出了保障措施，旨在为制造业向智能化转型中的设备可靠性管理提供理论与实践参考。

关键词：智能制造；机电设备；可靠性提升；故障预测与健康管理

引言

智能制造作为第四次工业革命的核心内容，正在深刻重塑制造业的生产模式和竞争格局。通过物联网、大数据、人工智能、数字孪生等新一代信息技术与制造技术的深度融合，智能制造系统实现了自感知、自学习、自决策、自执行和自适应。在这一背景下，机电设备不仅仅是执行加工任务的物理实体，更成为信息物理系统的重要组成部分。设备运行状态的微小偏差或突发故障，不仅直接导致生产中断和质量损失，还可能通过信息系统传导引发更大范围的调度紊乱和决策失误，由此带来的停机成本和安全风险呈指数级上升。可靠性是衡量机电设备在规定时间和条件下完成规定功能的能力的内在属性。在传统大规模生产模式下，设备的可靠性与生产节拍之间的耦合度相对较低，计划性维护和备用机组的配置能够较好地缓冲故障影响。然而，在智能制造的高柔性、高节拍和少人化运行环境下，设备可靠性的管理逻辑发生了根本性转变——从单纯的“减少故障”升级为“确保系统整体的韧性与可预测性”。面对这一转变，传统以统计学方法和经验数据为基础的可靠性管理方法已显力不从心。本文立足于智能制造的技术特征，系统分析其对机电设备可靠性的新要求与新挑战，并在此基础上探究覆盖设备全生命周期的可靠性提升路径，以期为制造企业的智能化转型提供有价值的理论参考。

1 智能制造对机电设备可靠性提出的新挑战

1.1 生产系统的高度耦合性要求更高的持续运行能力

智能制造的显著特征之一是生产系统的高度集成与协同。自动化产线、智能物流系统、仓储管理系统与制造执行系统之间形成了紧密的数据和物质流耦合。一台设备的临时停机不再仅影响本工序，而是通过物料配送中断、在制品积压和计划排程紊乱等连锁反应，迅速扩散为整条产线乃至整个车间的效率衰减。这种高度耦合性迫使设备的可靠性要求从事后的平均无故障时间上升到系统级的连续性保证，即设备需具备在复杂扰动条件下维持关键功能的能力。

1.2 柔性化与变批量生产对设备可靠性的动态需求

智能制造致力于满足多品种、小批量的定制化生产需求，这对设备提出动态多工况的运行要求。同一台设备需频繁在不同工艺参数、不同加工对象之间切换，其载荷谱、热特性和振动特征处于持续变化之中[1]。传统基于固定工况设计的可靠性指标难以全面表征这种动态运行环境下的真实可靠性水平。应力与强度的时变特性、加速老化的不确定性以及切换过程中的瞬态冲击，都要求可靠性分析方法从静态向动态演变。

1.3 少人化与黑灯工厂对故障容限的严苛约束

随着无人化车间和黑灯工厂模式的推广，现场操作人员大幅减少，设备异常时的即时人工干预能力被严重削弱。设备须具备更强的自主运行能力和故障容限，在出现异常征兆时能够自动调整运行参数或降级运行，避免突发性停机，并为远程维护争取时间窗口。这一趋势使得设备可靠性的内涵从“少出故障”拓展为“故障可预测、状态可自愈”。

1.4 数据驱动环境下的可靠性新维度

在智能制造中，设备不仅是物理实体，也是数据的生产者和消费者。设备产生的运行数据直接输入质量追溯系统、能耗管理系统和排程优化算法，数据的不准确、延迟或缺失将导致上层决策偏差。因此，数据质量

和信息完整性成为设备可靠性的附加维度——设备不仅需要可靠地工作，还需要可靠地“通信”和“报告”。

2 传统可靠性方法的适用边界与局限

2.1 统计可靠性模型在智能场景下的失效

传统可靠性工程以概率统计为基础，通过寿命试验和现场故障数据拟合分布模型（如指数分布、威布尔分布）来评估设备的可靠度。该方法依赖于“同质群体”假设和“稳态工况”前提。然而，智能制造中每台设备的运行轨迹高度个性化，服役载荷各不相同，传统的大样本统计推断方法失去了理论基础。用群体统计规律来评估个体设备的实时可靠性，误差显著增大。

2.2 预防性维护计划的刚性缺陷

基于平均故障间隔时间的定期维护策略是传统可靠性管理的主要手段。在智能生产环境中，这种刚性维护模式暴露出一系列弊端：过度维护造成资源浪费和额外停机损失，而维护不足则导致非计划故障[2]。更重要的是，定期维护无法应对突发性随机故障，也无法适应生产节奏的动态变化。在柔性制造场景中，固定周期的维护计划与波动的生产任务之间常常发生冲突，维护窗口的可获得性成为新的约束。

2.3 故障响应模式与智能制造时效性要求之间的矛盾

传统故障处理遵循“发生—报告—诊断—维修”的串行流程，响应周期较长。而智能制造系统要求设备异常在分钟级甚至秒级内被感知和响应，否则将造成大规模生产紊乱。在少人化环境下，故障诊断和维修决策的时效性矛盾更为尖锐，仅靠现场人员的经验和离散的检测手段已无法满足要求。

2.4 对退化过程和隐性问题感知不足

传统方法对设备性能的缓慢退化（如精度衰减、效率下降、能耗增加）缺乏有效的感知手段。这些“亚健康”状态虽不直接导致停机，但会通过产品质量波动和能耗异常转化为隐性损失。在智能制造追求零缺陷、零浪费的目标下，此类隐性问题的重要性被大幅提升。

3 机电设备可靠性提升的智能化路径

3.1 智能感知与多源数据融合的状态监测

提升可靠性的起点是获取准确、全面的设备状态信息。在智能制造的框架下，应在设备关键部位部署多类型传感器——振动、温度、电流、压力、位移、声发射等，构建覆盖机械、电气、液压、润滑等子系统的全方位感知网络。更重要的是，将多源传感器数据与PLC内部的运行参数、生产管理系统中的质量数据和工艺数据相融合，形成互为补充、交叉验证的设备状态全景画像。异构数据的时空对齐和特征提取是实现有效状态监测的前提。

3.2 故障预测与健康管理技术

故障预测与健康管理（PHM）是从“被动维修”走向“主动预护”的核心技术手段，其功能架构可分解为三个层次。首先是故障早期微弱信号的检测与特征增强——利用小波包分解、经验模态分解和谱峭度分析等信号处理方法，从强背景噪声中提取轴承磨损、齿轮点蚀、轴系不对中等早期故障的敏感特征。其次是退化趋势预测——基于提取的特征参数，采用长短时记忆网络、高斯过程回归或状态空间模型，对设备性能退化轨迹进行建模，预测剩余使用寿命的分布区间[3]。最后是维修决策生成——将预测结果与生产计划、备件库存和人员配置等信息综合优化，生成精准的维修时机建议，避免过早或过晚维护。

3.3 数字孪生驱动的可靠性设计迭代

数字孪生技术在可靠性提升中的应用不仅限于运行阶段，更可延伸至设计源头。在虚拟空间中构建机电设备的高保真数字孪生体，利用多物理场耦合仿真（结构力学、热力学、流体力学、电磁学）和控制系统仿真，在设计阶段即可对关键零部件的疲劳寿命、热变形特性和控制鲁棒性进行全面评估。通过注入虚拟的故障模式和极端工况，提前发现设计薄弱环节，实现“一次设计、多次验证”的可靠性设计迭代。数字孪生的优势在于能够模拟物理样机难以企及的大规模极限测试，从而大幅度缩短可靠性增长周期。

3.4 自适应与容错控制策略

在控制层面，提升可靠性的直接手段是使设备具备对环境变化和自身性能退化的自适应能力。通过在线辨识关键参数的变化（如伺服系统惯量比、摩擦系数、负载特性），自动调整控制增益和前馈补偿，使设备在性能退化过程中仍然维持所需的动态精度和响应速度。对于多轴协同系统，可设计基于性能裕度的动态任务分配策略——当某轴出现驱动力不足时，系统自动调整加速度曲线或重新分配负载，避免该轴过载触发停机[4]。容错控制的核心思想是不追求完全避免故障，而是通过控制策略的柔性调整，让设备在局部功能受限的条件下维持安全运行，为维护活动的安排争取时间。

3.5 基于数字化的智能运维决策

可靠性管理上升到系统层面，需要建立集成化的智能运维决策平台。该平台应实现三项核心功能：统一资源视图——实时呈现全厂关键设备的健康状态、剩余寿命和维修历史，支持全局视角下的状态比对和优先级排序；动态排程优化——将维护任务与生产计划进行协同

排程，将非紧急维护安排在换模或停机间隙，最大限度减少对生产的影响；知识管理与案例推理—— 将历史故障案例、解决方案和维修经验结构化为知识图谱，为后续类似故障的诊断和处置提供决策支持，减少对人的经验的过度依赖。

4 实施保障与支撑条件

4.1 数据治理体系与基础设施

智能化可靠性提升高度依赖数据的质量与可用性。企业须建立标准化的设备数据采集规范，统一传感器的选型原则、安装位置、采样频率和数据传输协议。构建稳定可靠的数据存储与计算基础设施（如时序数据库、边缘计算节点、云计算资源），确保数据的完整性、安全性和实时可达性。同时，须重视数据标注工作—— 对历史故障数据、维护记录和运行工况进行系统化标注，这是训练有效预测模型的必要基础。

4.2 标准规范与评价体系

在行业层面，需要制定面向智能制造的机电设备可靠性评价标准体系，包括数据接口标准、状态评价指标体系和健康等级划分规范，为不同厂商、不同类型设备之间的数据互认和跨系统集成提供基础。在企业内部，应建立设备可靠性管理的量化考核指标体系，将可用度、预测准确率、非计划停机时间等关键绩效指标纳入考核，形成目标牵引的持续改进机制。

4.3 复合型人才与组织变革

智能化可靠性管理对从业人员的知识结构提出了新要求，需要既懂机械、电气、液压等传统设备技术，又掌握传感器、信号处理、机器学习和数据分析技能的复合型人才。企业应通过内部培训与外部引进相结合的方式构建人才梯队，推动设备维护部门从单纯的“修理工”向“数据驱动设备管理者”转型。在组织架构上，可考虑设立专门的设备健康管理团队，赋予其数据获取、分析决策和维修调度的相应权限，打破传统的维修与生产、信息部门之间的壁垒。

4.4 投入产出预期与实施策略

智能化可靠性提升是一个系统性工程，不宜追求一步到位。建议采取“试点先行、分步推广”的实施策略—— 选取产线中最关键或故障率最高的设备作为试点，完成从感知部署、预测建模到决策应用的全流程验证，在取得可见成效后再逐步推广至整个车间。在投入产出方面，智能化改造的效益不仅体现在减少维修成本和停机损失上，还应综合考虑质量提升、能耗节约和人力优化等间接效益，以更全面地评估投资回报。

5 结语

智能制造为机电设备可靠性管理带来了双重影响：一方面，生产系统的高度耦合性、柔性化和少人化趋势对设备可靠性提出了远超以往的要求；另一方面，新一代信息技术的渗透又为突破传统方法的局限、实现可靠性的质的飞跃提供了全新的技术工具。本文所构建的可靠性提升路径，以智能感知为感知层，以PHM为分析层，以数字孪生为设计层，以自适应控制为执行层，以智能运维为决策层，形成了一个覆盖“设计—运行—维护”全生命周期的技术闭环。核心观点在于：智能制造时代的可靠性管理，其逻辑重心已从“故障后的修复”前移至“退化前的预判”，从“单一设备的保障”扩展为“系统韧性的构建”。这一转变不仅是技术的升级，更是管理理念和组织能力的深刻变革。未来，随着边缘计算能力的增强、深度学习算法的演进以及工业互联网平台的成熟，机电设备的可靠性管理将向更加精准、自主和协同的方向持续发展，为制造业的高质量发展提供坚实的装备保障。

参考文献

[1]周济,谭建荣,李培根.智能制造的内涵、关键技术与发展趋势[J].中国工程科学,2022,24(4):1-9.

[2]钟掘,黄洪钟,黄文虎.复杂机电系统可靠性设计理论与方法研究综述[J].机械工程学报,2023,59(14):1-16.

[3]彭喜元,彭宇,刘大同.故障预测与健康管理技术发展综述[J].仪器仪表学报,2022,43(10):1-13.

[4]陶飞,张萌,程江峰.数字孪生十问：从概念到应用[J].计算机集成制造系统,2023,29(2):345-358.